

## Режущая керамика для точения специализированной нержавеющей труднообрабатываемой стали

**Мокрицкий Борис Яковлевич**<sup>1</sup>, доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Машиностроение»

**Саблин Павел Алексеевич**<sup>\*2</sup>, кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Машиностроение»

**Космынин Александр Витальевич**<sup>3</sup>, доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Кораблестроение и компьютерный инжиниринг»

*Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре (Россия)*

\*E-mail: ikpmto@knastu.ru

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4727-9873>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5950-9010>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3200-0190>

Поступила в редакцию 08.09.2023

Пересмотрена 23.01.2024

Принята к публикации 20.02.2025

**Аннотация:** Показана возможность применения в качестве токарного инструмента режущей керамики. Используются сменные типовые режущие пластины, выполненные из режущей керамики марок ВОК-60 и ВОК-71. В работе на основе имитационного моделирования в программной среде defo3m обоснована и затем экспериментально подтверждена возможность высокоскоростной обработки указанной режущей керамикой. Дополнительно предложено нанесение упрочняющих покрытий методом конденсации с ионной бомбардировкой, что обеспечило повышение скорости резания до 100 м/мин и более с повышением периода стойкости режущей керамики с 3 до 3,8 раз. Проведены исследования максимальных напряжений в инструментальном материале и скорости деформации обрабатываемого материала. Для выбора рациональных решений при имитационном моделировании использовали параметры «температура в зоне резания», «напряжения в инструментальном материале», «износ инструмента», что характеризует сложно-напряженное состояние материала инструмента. Переход от этих параметров к прогнозному проектированию режущей керамики выполняли путем измерения силы резания при натуральном резании. Измеренные значения составляющих силы резания использовали для расчета напряжений в инструментальном материале. В результате выполненного исследования подтверждена гипотеза о том, что режущая керамика способна работать в условиях обработки вязких труднообрабатываемых коррозионностойких специализированных нержавеющих сталей типа марки 09X17H7Ю (EU 1.4568, X7CrNiAl17-7), имеющих высокое содержание хрома (16–17,5 %) и никеля (7–8 %). Предложены оригинальные технологические приемы повышения работоспособности режущей керамики за счет специальной термообработки и нанесения покрытий. В частности, термообработка в вакууме при температуре 1100–1400 °С в течение 20–40 мин повысила объемную прочность керамики, а дополнительная химико-термическая обработка путем ионного азотирования, выполненная на заключительном этапе термообработки, позволила легировать связку.

**Ключевые слова:** режущая керамика; точение нержавеющей стали; моделирование процесса точения; скорость резания.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00393, <https://rscf.ru/project/23-29-00393/>.

**Для цитирования:** Мокрицкий Б.Я., Саблин П.А., Космынин А.В. Режущая керамика для точения специализированной нержавеющей труднообрабатываемой стали // Frontier Materials & Technologies. 2025. № 1. С. 35–45. DOI: 10.18323/2782-4039-2025-1-71-3.

### ВВЕДЕНИЕ

Механическая обработка труднообрабатываемых коррозионностойких нержавеющих сталей типа 09X17H7Ю является проблемой для многих машиностроительных отраслей. Это связано с большим содержанием в 09X17H7Ю хрома (16–17,5 %) и никеля (7–8 %). Область применения этой стали растет: она применяется в судостроении, морских сооружениях, химической и пищевой отраслях, космосе и оборонной промышленности. Соответственно, растет доля инструментальных затрат в себестоимости изготавливаемой продукции. Традиционно такие нержавеющие стали обрабатывают твердосплавным металлоре-

жущим инструментом. При этом скорость резания не может превышать 50 м/мин, дополнительными мерами удается повысить ее до 60 м/мин. Такая ситуация тормозит рост производительности обработки. Необходимы более существенные меры.

В российском сегменте литературы нами не обнаружено публикаций, посвященных решению указанной проблемы. Публикации по применению режущей керамики в иных условиях имеются [1; 2], но они не решают задач повышения производительности обработки указанной нержавеющей стали. Зарубежные публикации [3–6] рассматривают вопросы применения режущей керамики

© Мокрицкий Б.Я., Саблин П.А., Космынин А.В., 2025

в общем смысле, т. е. ко всем маркам нержавеющей стали. В них нет привязки к стали марки 09X17H7Ю или близким к ней аналогам зарубежных сталей. В каталогах ведущих в мире инструментальных фирм Walter (Германия), Sandvik Coromant (Швеция), Mitsubishi (Япония), ISCAR (Израиль) приведенные рекомендации по обработке специальных нержавеющей сталей носят общий характер, без конкретизации марок сталей, т. е. все нержавеющей труднообрабатываемые стали объединены в одну условную группу. Апробация их рекомендаций на российской стали 09X17H7Ю показала, что режущая керамика ВОК-60 и ВОК-71 разрушается на первых же минутах резания [1; 2]. Это позволяет заключить, что рекомендации несостоятельны и не решают задачу повышения производительности обработки применительно к токарной обработке стали марки 09X17H7Ю.

Авторы имеют собственный опыт обработки труднообрабатываемых нержавеющей сталей твердосплавным металлорежущим инструментом. Так, в работах [1; 2] показано, что фрезерование монолитными твердосплавными концевыми фрезами возможно, но не перспективно из-за ограниченного периода их стойкости. Более перспективно применение сборных фрез с механическим креплением твердосплавных режущих пластин. В указанных работах приведены результаты применения разных сборных фрез и рекомендации по параметрам режима резания ими.

Эффективность применения твердосплавного инструмента ограничена по производительности обработки из-за низкой скорости резания. Поэтому в данной статье рассмотрен опыт более высокопроизводительной обработки за счет применения режущей керамики. Работа выполнена на примере точения российской стали марки 09X17H7Ю и близких к ней труднообрабатываемых нержавеющей сталей марок 12X18H10T, 13X15H5 АМ-3. Использована программная среда deform для имитационного моделирования эксплуатационных свойств [7] и физико-технических характеристик наиболее рациональных инструментальных материалов. В исследовании ставилась задача определить необходимые (входные и выходные) переменные при имитационном моделировании. Оценивалась возможность применения черной режущей керамики марок ВОК-60 и ВОК-71 для высокопроизводительной токарной обработки стали марки 09X17H7Ю и близких к ней сталей марок 12X18H10T, 13X15H5 АМ-3. При этом оценивалась возможность повышения скорости резания до 100 м/мин и более за счет применения износостойких покрытий на режущей керамике.

Цель работы – исследовать возможность высокопроизводительной токарной обработки заготовок деталей, выполненных из труднообрабатываемой стали марки 09X17H7Ю со скоростью резания более 50 м/мин путем нанесения на режущую керамику ВОК-60 и ВОК-71 наноструктурированных покрытий и за счет предшествующей термообработки.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Методологический подход к решению проблемы и ее задач

В работе использован методологический подход к разработке токарных режущих пластин, выполненных из инструментальной режущей керамики, основанный

на имитационном моделировании режущего инструмента в программной среде deform [7], которая снабжена большим количеством приложений в виде разных библиотек. Это позволило подбирать новые варианты моделирования и проектировать разные условия эксплуатации режущего инструмента. Рассматривалась плоская ортогональная схема свободного резания, представляющая внедрение режущего клина призматической формы в материал заготовки детали. Режущий клин принимали как твердое тело, полностью соответствующее форме и геометрии типовой сменной пластины. В качестве ограничений принято: недопущение разрушения покрытия по хрупкому механизму; предотвращение пластической деформации покрытия и субстрата из-за избыточных температур в зоне резания. Для имитационного моделирования точения режущей керамикой использовали подход, известный из работы [7], но с существенной доработкой подхода.

Математический аппарат программной среды deform построен на вычислении внутренних напряжений в материале. Для их описания использовали тензор напряжений. Уравнение и характеристики тензора напряжений приведены ниже, в них использованы принятые в работе [7] обозначения с их размерностью:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}.$$

Здесь нормальные напряжения  $\sigma$  и касательные напряжения  $\tau$  рассматриваются по соответствующим осям координат  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . Одной из основных характеристик тензора напряжений является его квадратичный инвариант, который обычно называют эффективным напряжением:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}.$$

Деформация элемента описывается компонентами  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ , которые определяются смещениями элемента  $u, v, w$  в направлении координат  $x, y, z$  соответственно:

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}; & \gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}; \\ \epsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y}; & \gamma_{yz} &= \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}; \\ \epsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z}; & \gamma_{zx} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}. \end{aligned}$$

Принято достаточным введение следующих входных параметров и условий: физико-механические характеристики обрабатываемых материалов и архитектура (особенности конструкции, состава, технологии нанесения) покрытий инструмента. Принято достаточным получение выходных прогнозных результатов по параметрам «температура в зоне резания», «напряжения в инструментальном материале», «износ инструмента». При необходимости дополнительно применяли

параметры «деформация материала инструмента», «скорость деформации материала инструмента». Это позволило характеризовать сложно-напряженное состояние инструмента. Переход от этих параметров к прогнозному проектированию архитектуры покрытий осуществляли путем контроля силы резания при натуральном резании. Значения составляющих силы резания использовали для расчета напряжений в инструментальном материале по известной зависимости профессора С.И. Петрушина [6; 7].

Прогнозное проектирование режущей керамики выполняли путем измерения силы резания при натуральном резании. В процессе резания измеряли все три составляющие силы резания. Переход от значений составляющих силы резания к напряжениям в инструментальном материале выполняли по зависимостям, приведенным в работах [6–9]:

$$\sigma_{\max} = 2 \cdot \frac{P_y \cdot [\cos \gamma \cdot \sin(\gamma + \Theta) - \sin \alpha \cdot \cos(\alpha - \Theta) + \beta \cdot \cos \Theta]}{r \cdot [(\sin^2 \alpha - \cos^2 \gamma) - \beta^2 + (\sin \alpha \cdot \cos \alpha - \sin \gamma \cdot \cos \gamma)]} + \frac{P_z \cdot [\sin \alpha \cdot \sin(\alpha - \Theta) - \cos \gamma \cdot \cos(\gamma + \Theta) - \beta \cdot \sin \Theta]}{r \cdot [(\sin^2 \alpha - \cos^2 \gamma) - \beta^2 + (\sin \alpha \cdot \cos \alpha - \sin \gamma \cdot \cos \gamma)]}$$

где  $P_y$  – радиальная составляющая силы резания;  
 $P_z$  – главная составляющая сила резания;  
 $\alpha$  – главный задний угол;  
 $\gamma$  – передний угол;  
 $r$  и  $\Theta$  – полярные координаты в главной секущей плоскости резания.

По результатам экспериментальных испытаний строили графики зависимости величины износа от применяемых покрытий. По величине износа за равное время обработки выбирали наиболее рациональные покрытия исходя из того, что чем меньше величина износа, тем рациональнее покрытие. В качестве покрытий использовали металлы 4–8 групп таблицы Менделеева ( $Ti+TiN+(NbZrTiAl)N$ ,

$Ti+Zr+ZrN+(ZrAlNb)N$ ,  $Ti+Zr+TiCN+(TiZrAl)CN$ ). Поверх металлического слоя покрытия наносили нитридный или карбонитридный слой покрытия для снижения взаимодействия с обрабатываемым материалом.

Для разработки (виртуального проектирования в программной среде defom) рациональных вариантов инструмента из режущих керамик и, следовательно, для проектирования архитектуры их покрытий применена модель, представленная на рис. 1. В модели в расчет принимались варианты, в которых период стойкости (в модели он назван период работы  $\Pi$ ) должен вырасти в 2–4 раза, производительность  $N$  и качество  $K$  обработки должны увеличиться в сравнении с исходным вариантом, а затраты на инструмент  $Q$  должны снизиться.

В рамках указанного подхода принято возможным в качестве мер по повышению работоспособности инструмента применять нанесение покрытий на инструментальный материал. Этот путь успешно зарекомендовал себя при обработке основных конструкционных материалов твердосплавным инструментом. Предлагаемый подход заимствует эту методологию для повышения работоспособности режущей керамики, развивая и адаптируя ее для конкретных условий эксплуатации инструмента.

Авторы сочли методологической необходимостью провести сравнение технологий изготовления керамического инструмента и твердосплавного инструмента с покрытиями. Для керамического инструмента использовали рекомендации работы [10], для твердосплавного – рекомендации работы [11].

### Сопоставление особенностей технологических процессов изготовления керамического и твердосплавного инструмента

Технологический процесс (ТП) изготовления керамического и твердосплавного инструмента в общем виде представлен на рис. 2. В блоке А показано, что именно принято во внимание – основа инструментального материала, например режущая керамика марки

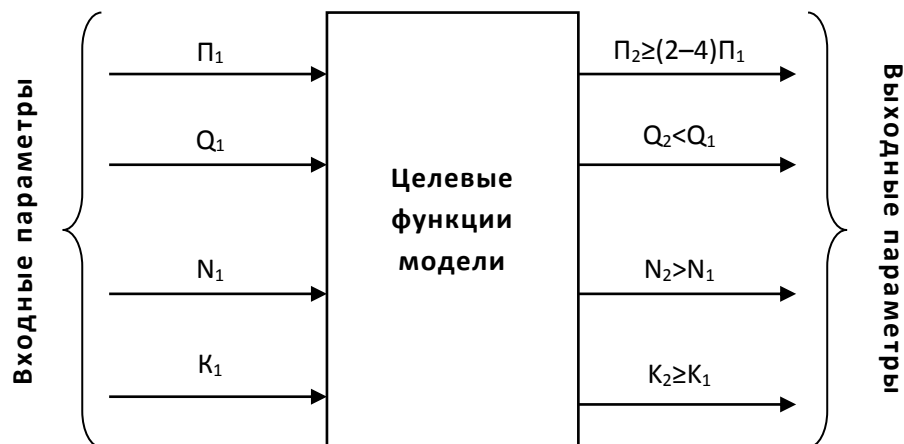
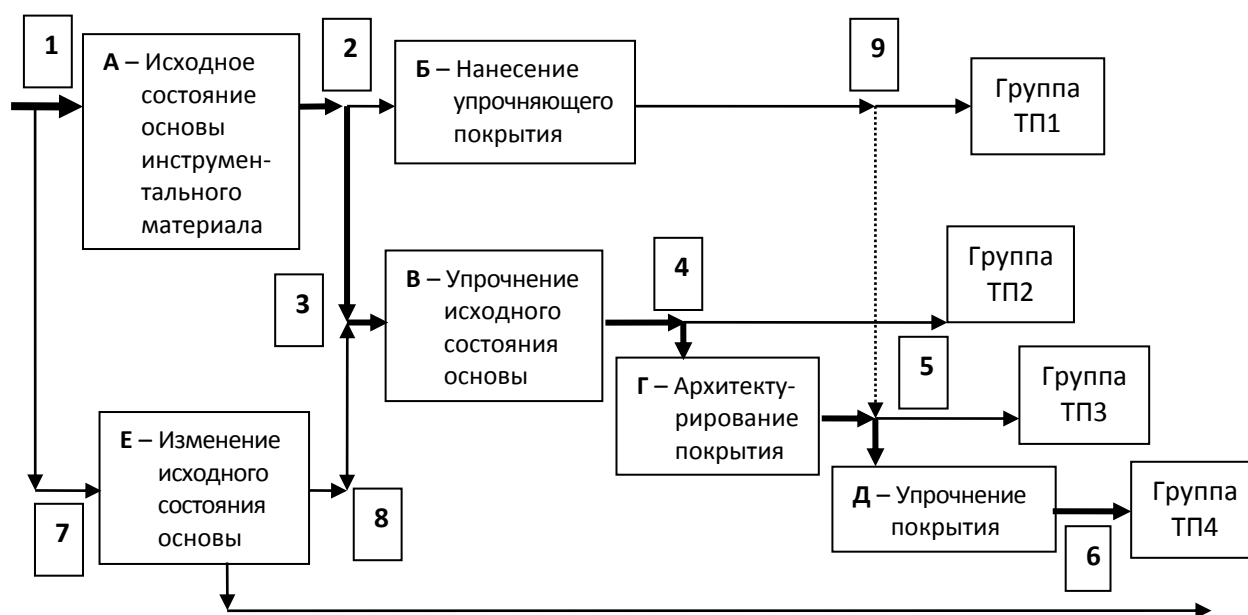


Рис. 1. Модель реализации имитационного (виртуального) проектирования инструментальных материалов:

$\Pi$  – период стойкости;  $Q$  – затраты на инструмент;  $N$  – производительность;  $K$  – качество обработки

Fig. 1. A model for the implementation of simulation (virtual) design of tool materials:

$\Pi$  – service life;  $Q$  – tool costs;  $N$  – productivity;  $K$  – quality of treatment



**Рис. 2.** Обобщенная схема технологических процессов изготовления твердосплавного и керамического инструмента: ТП1, ТП2, ТП3, ТП4 – технологические процессы; 1, 2...9 – узловые точки разветвления технологических процессов  
**Fig. 2.** Generalized scheme of technological processes for manufacturing hard-alloy and ceramic tools: ТП1, ТП2, ТП3, ТП4 – technological processes; 1, 2...9 – nodal points of technological process branching

ВОК-60 или инструментальный твердый сплав марки ВК8. Это считается первым этапом изготовления инструмента. Следующим этапом технологического процесса изготовления инструмента является нанесение покрытия (блок Б). Эта последовательность выполнения этапов позволила получить технологические процессы, названные группой ТП1. Под технологическими процессами в группе ТП1 понимается использование того или иного материала основы инструмента, того или иного процесса осаждения покрытия и т. д.

Если потребовалось применение упрочняющих воздействий на инструментальный материал основы (например, ионное азотирование основы, т. е. сплава ВК8), то формируется цепочка действий по разветвлениям в точках 2 и 3. Эта последовательность выполнения этапов позволила получить технологические процессы, названные группой ТП2. ТП2 разработаны и применены для того, чтобы повысить эксплуатационные показатели режущего инструмента. Однако ТП1 являются более простыми в реализации и более дешевыми.

Если в результате реализации ТП1 или ТП2 работоспособность инструмента или производительность обработки оказались недостаточными, то возникает потребность в группе технологических процессов ТП3. Этого можно достичь архитектурованием покрытия (блок Г). Под архитектурованием понимается создание того или иного покрытия (однослойного, многослойного, нитридного, карбидного, карбонитридного, с одинаковой или разной толщиной слоев, с применением одинаковых или разных методов осаждения покрытия и т. д.).

Если и этого оказалось недостаточно, то путем упрочнения покрытия (блок Д) можно реализовать группу технологических процессов ТП4. Под упрочнением покрытия

понимаются дополнительные меры по повышению эксплуатационных свойств покрытия в целом или отдельных его слоев. Например, при нанесении первого слоя покрытия толщиной менее 1 мкм в покрытии могут быть несплошности, т. е. оголенные места основы инструментального материала. Такое нежелательно. Несплошности могут провоцировать схватывание материала основы инструментального материала с обрабатываемым материалом либо снижать прочность сцепления этого слоя с последующим. Для «залечивания» таких несплошностей можно применять дополнительные воздействия, например ионное азотирование [11] слоя с несплошностями перед нанесением следующего слоя.

Технологически ТП4 сложнее, чем ТП3, а ТП3 сложнее, чем ТП2 и ТП1. Соответственно, стоимость реализации этих технологических процессов различная: у ТП4 она выше, чем у ТП3, и т. д. Зато работоспособность инструмента, изготовленного по ТП4, выше, чем изготовленного по ТП3, и т. д.

Если оказалось, что работоспособности инструмента, изготовленного по ТП4, все еще недостаточно для конкретных условий обработки заготовок деталей, то можно целенаправленно воздействовать на основу инструментального материала так, чтобы повысить ее эксплуатационные свойства. Речь идет о минимизации или ликвидации тех дефектов на основе инструментального материала, которые образовались в процессе его изготовления, например микротрещин механического или термического происхождения, образовавшихся при шлифовке режущих пластин или при заточке на них требуемых фасок, скруглений, радиусов. Такие трещины присутствуют и на твердосплавных пластинах [11], и на режущей керамике [10]. В этих случаях



можно изменить исходное состояние основы инструментального материала (блок Е), например залечить эти микротрещины нанесением [11] того или иного покрытия до нанесения основного покрытия либо подвергнуть инструментальную основу «травлению» путем ионного азотирования [11].

Таким образом, реализуется группа технологических процессов (условно обозначим ее ТП<sub>1</sub>, на рис. 2 она не показана), более сложная, чем ТП<sub>4</sub>. Такой технологический процесс более затратный, но он может быть наиболее эффективным с позиций повышения работоспособности режущего инструмента и повышения производительности обработки.

### Материалы и методы

В качестве материала для режущего инструмента в работе использована режущая керамика марок ВОК-60 и ВОК-71 (ГОСТ 19043-80, 25003-81).

Использовали труднообрабатываемую нержавеющую сталь марки 09X17H7Ю (ЭИ 973) (старое обозначение 0X17H7Ю (аналоги в Евросоюзе – 1.4568, в США – 631.S17700, в Англии – 301 S81)). Выпускается в соответствии с ГОСТ 19904-90 (прокат листовой холоднокатаный) и ГОСТ 7350-77 (стандарт СТ СЭВ6434-88).

Для сравнения и обобщения результатов использовали также менее прочные нержавеющие стали марок 12X18H10T и 13X15H AM-3. Сталь марки 13X15H5 AM-3 принята к анализу как базовая (рядовая сталь, не представляющая особых сложностей при лезвийной обработке). Сталь марки 12X18H10T выбрана как труднообрабатываемая. Данная сталь уникальна тем, что на предел ее прочности существенно влияют условия термообработки.

Сталь марки 12X18H10T изготавливается согласно ГОСТ 5362-2014 «Нержавеющие стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные», позиция 6-42. В ней 17–19 % хрома и 9–11 % никеля. Ее твердость по Бринеллю НВ=179 МПа. Ударная вязкость КС<sub>У</sub> составляет 285 кДж/см<sup>2</sup>. Сведения о прочности этой стали различны, например предел прочности  $\sigma_{-1}$ =279 МПа,  $\sigma_B$ =610 МПа,  $\sigma_{0,2}$ =196–236 МПа. Ближайшими заменителями являются стали марок 08X18Г8Н2Т и 12X18H9Т. Аналогом в США являются стали марок 321, 321H, S32109, в Германии – X12CrNiNi8-9.

Сталь марки 13X15H5 AM-3 (иные обозначения – ЭП310, ВНС-5) изготавливается по отраслевому стандарту ОСТ 1 90005-91 и по техническим условиям ТУ14-1-1271-75 завода-изготовителя. Ближайшими ее заменителями являются стали марок 07X16H6 (ЭП-288), 18X14H4 AM-3. Она обладает хорошим сочетанием прочности, ударной вязкости и пластичности. Трудность ее обработки обусловлена значительным наличием хрома (14–16 %) и никеля (4–6 %). Ее твердость зависит от многих параметров, в первую очередь от условий ее упрочнения. Небольшой предел прочности (500–800 МПа) этой стали отмечен при ее термообработке в нормальных условиях. При закалке холодом предел прочности возрастает до 1200–1700 МПа.

Термообработку и нанесение покрытий осуществляли в установке «Булат» (Россия), работающей по методу конденсации с ионной бомбардировкой. Термообработку в вакууме проводили при нагреве до 1100–1400 °С в течение 20–40 мин. В качестве покрытий ис-

пользовали металлы 4–8 групп таблицы Менделеева. Применение в установке «Булат» испаряемых катодов, изготовленных из металлов 4–8 групп таблицы Менделеева, позволило получать разные покрытия. Наиболее рациональными приняты следующие покрытия:

а) нижний слой выполнен из титана, на него осажден слой нитрида титана, затем осажден нитрид комбинации металлов ниобий, цирконий, титан, алюминий – Ti+TiN+(NbZrTiAl)N;

б) нижний слой выполнен из титана, на него осажден слой циркония, на него осажден слой нитрида циркония и затем осажден нитрид комбинации металлов цирконий, алюминий, ниобий – Ti+Zr+ZrN+(ZrAlNb)N;

в) нижний слой выполнен из титана, на него осажден слой циркония, затем осажден слой карбонитрида титана и затем нанесен карбонитрид комбинации металлов титан, цирконий, алюминий – Ti+Zr+TiCN+(TiZrAl)CN.

Режущие пластины, выполненные из режущих керамик ВОК-60 и ВОК-71, испытывали в разном их состоянии, а именно:

а) в состоянии поставки с завода-изготовителя (ООО «Завод технической керамики» г. Апрелевка Московской области);

б) после дополнительной термообработки (в вакууме при температуре 1100–1400 °С в течение 20–40 мин), что позволяло произвести релаксирование внутренних напряжений в пластине; это повысило прочность керамики;

в) после того, как пластины подвергали дополнительной термообработке с последующим ионным азотированием на установке типа «Булат», ионная бомбардировка позволяла легировать связку, что повысило прочность границ по зернам режущей керамики;

г) после того, как пластины подвергали нанесению упрочняющих покрытий на установке типа «Булат».

В каждом виде этих испытаний применяли по 10 (и более при необходимости) квадратных четырехгранных пластин, т. е. минимум 40 испытаний (10 пластин по 4 режущих кромки). Поскольку видов испытаний было 4 (указаны выше как а, б, в и г), то общее число испытаний составило 160. Поскольку режущие пластины были двухсторонними (т. е. их можно было не только поворачивать, но и переворачивать обратной стороной), то итоговых испытаний было проведено 320.

Контролировали время работы каждой режущей кромки до износа 0,5 мм по задней грани или до скола режущей кромки.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При использовании технологических процессов изготовления твердосплавного и керамического инструмента по схеме, приведенной на рис. 2, экспериментально установлено следующее:

а) период стойкости инструмента до износа 0,5 мм по задней грани при точении заготовки детали, выполненной из стали 09X17H7Ю, в случае применения режущей керамики ВОК-60 и ВОК-71 выше до 7–10 раз для ТП<sub>1</sub> и ТП<sub>4</sub> в сравнении с инструментом, выполненным из твердосплавного материала марки ВК8;

б) при этом производительность обработки режущей керамикой ВОК-60 в сравнении с твердосплавным режущим инструментом ВК8 возрастает до 1,4–1,6 раза при тех же параметрах режима резания, а для режущей

керамики ВОК-71 возрастает более чем в 2 раза. Это дает возможность считать, что разработан арсенал технологических процессов, позволяющий выбирать для конкретных условий обработки наиболее рациональный технологический процесс по периоду стойкости инструмента.

Результаты применения режущей керамики на примере марки ВОК-71 показаны в таблице 1. Указано время работы (период стойкости) режущей пластины при наружном точении заготовки, выполненной из стали 09X17H7Ю, до достижения износа пластины 0,5 мм или до скола режущей кромки. Керамика ВОК-71, находящаяся в исходном состоянии, имела период стойкости 5 мин. Керамика ВОК-71, получившая термообработку, имела период стойкости 9 мин – в 1,8 раза выше, чем керамика, находящаяся в исходном состоянии. Причиной такого повышения периода стойкости является релаксация внутренних напряжений в режущей керамике после термообработки. Керамика ВОК-71, получившая термообработку и ионное азотирование, имела период стойкости 14 мин. Это в 2,8 раза выше в сравнении с керамикой, находящейся в исходном состоянии, и в 1,5 раза выше, чем у керамики, получившей термообработку. Такой положительный результат с позиций периода стойкости режущей керамики сопровождается значительным приростом производительности обработки в сравнении с применением твердосплавного режущего инструмента вследствие повышенной скорости резания (120–140 м/мин для режущей керамики и 50 м/мин для твердого сплава, т. е. в 2,6 раза).

Примеры реализации имитационного моделирования в среде deform показаны на рис. 3 в виде скриншотов для керамики ВОК-71 (рис. 3 а, 3 б) и керамики ВОК-71 с покрытием  $Ti+TiN+(NbZrTiAl)N$  (рис. 3 с, 3 д). Из сопоставления скриншотов на примере ВОК-71 видно, что максимальные основные напряжения и результирующие скорости деформации предпочтительнее в случае применения покрытия, в данном случае покрытия  $Ti+TiN+(NbZrTiAl)N$ .

Числовые значения продольной, радиальной и вертикальной составляющих сил резания приведены в таблице 2. Из данных таблицы следует:

а) наибольшие значения составляющих силы резания имеют место при точении стали 09X17H7Ю в сравнении со сталями 12X18H10Т и 13X15H АМ-3, т. е. это случай, от которого следует ожидать минимальный период стойкости инструмента;

б) применение режущей керамики без покрытия приводит к росту всех составляющих силы резания, следовательно, применение покрытия рационально;

в) во всех рассмотренных случаях доминирует вертикальная составляющая силы резания, следовательно, именно она будет лимитировать период стойкости инструмента.

В ходе имитационного моделирования архитектуры разных покрытий получены результаты, представленные в таблице 3. В таблице показано, во сколько раз прогнозируется повышение периода стойкости режущей керамики при нанесении на нее одного из трех исследуемых покрытий. Влияние покрытия  $Ti+TiN+(NbZrTiAl)N$  показано для всего диапазона скоростей резания. Влияние остальных покрытий показано избирательно для тех случаев, где

прогнозировалось максимальное повышение периода стойкости. Из таблицы 3 следует, что:

а) применение покрытия  $Ti+TiN+(NbZrTiAl)N$  предпочтительно при скорости резания менее 100 м/мин для режущей керамики ВОК-60, при увеличении скорости резания предпочтительно применение керамики ВОК-71;

б) при высоких скоростях резания покрытие  $Ti+Zr+(TiCN)+(TiZrAl)CN$  предпочтительно для режущей керамики ВОК-60.

Пример влияния покрытий на составляющие силы резания приведен в таблице 4. Данные таблицы 4 показывают значительный вклад покрытия в снижение составляющих силы резания, что позволяет прогнозировать снижение интенсивности износа инструмента и повышение периода его стойкости. Применение покрытия привело к снижению вертикальной составляющей силы резания (именно она лимитирует период стойкости инструмента) в 1,2 раза для керамики ВОК-60 и в 1,4 раза для керамики ВОК-71, в то время как применение термообработки и ионного азотирования привело к ее сокращению всего лишь в 1,2 раза.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Подтверждена гипотеза о том, что режущая керамика способна работать при обработке вязких труднообрабатываемых коррозионностойких специализированных нержавеющей сталей типа марки 09X17H7Ю. Ранее считалось, что режущая керамика предназначена для обработки твердых материалов. Таким образом, расширена область применения черной режущей керамики. Подтверждена также гипотеза о возможности обработки стали марки 09X17H7Ю (EU 1.4568, X7CrNiAl17-7), имеющей высокое содержание хрома (16–17,5 %) и никеля (7–8 %).

При подтверждении гипотезы предложены оригинальные технологические приемы повышения работоспособности режущей керамики за счет специальной термообработки и нанесения покрытий. В частности, предложена термообработка в вакууме при температуре 1100–1400 °С в течение 20–40 мин, что повысило объемную прочность керамики, а дополнительная химико-термическая обработка путем ионного азотирования, выполненная на заключительном этапе термообработки, позволила легировать связку. Эта совокупность предложенных технологических мер обеспечила повышение скорость резания до 3 раз, что повысило производительность обработки до 17 %.

Приведенные в статье результаты имитационного моделирования процесса резания режущей керамикой и экспериментальных исследований позволили обнаружить ряд особенностей, которые ранее не были известны. Выявлен эффект существенного повышения производительности обработки, что делает режущую керамику эффективным конкурентом твердосплавному режущему инструменту при точении труднообрабатываемых специализированных нержавеющей сталей типа 09X17H7Ю. Этот эффект автор связывает с несколькими факторами, в том числе с применением покрытий, а также с применением термообработки и ионного азотирования.

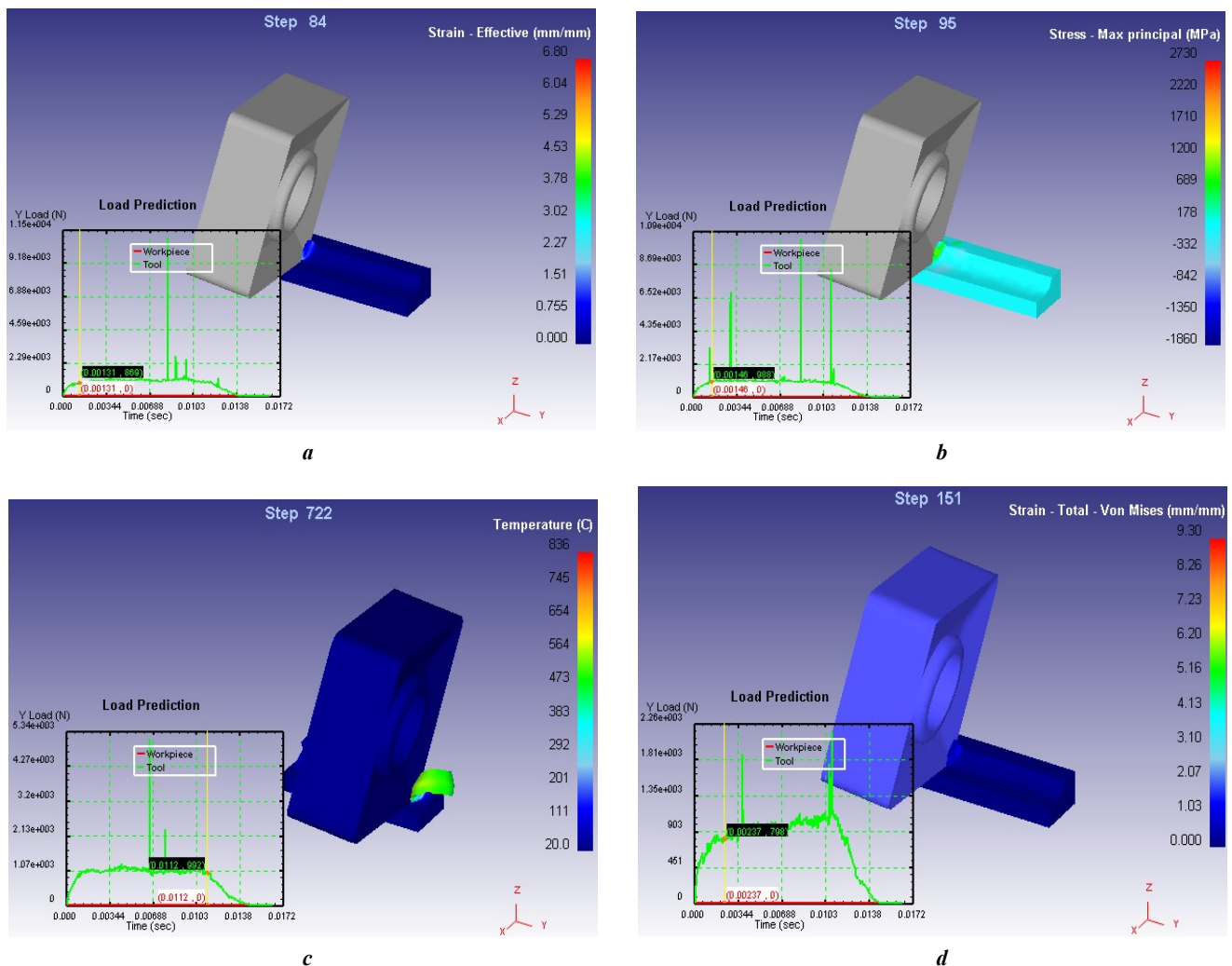
Установлено, что производительность обработки в сравнении с твердым сплавом марки ВК8 увеличилась в 1,4–1,6 раза для режущей керамики ВОК-60 и в 2,6 раза для

**Таблица 1.** Период стойкости пластин из режущей керамики ВОК-71 при наружном точении стали 09Х17Н7Ю (скорость резания 120–140 м/мин, подача 0,21 мм/об, заготовки глубина резания 1 мм, без применения смазывающе-охлаждающих технологических сред)

**Table 1.** Service life of plates made of VOK-71 cutting ceramics during external turning of 09H17N7Yu steel (cutting speed is 120–140 m/min; feed is 0.21 mm/rev of a blank; cutting depth is 1 mm; without the use of lubricating and cooling process media)

Состояние режущей пластины		
ВОК-71 в исходном состоянии	ВОК-71 + термообработка	ВОК-71 + термообработка + ионное азотирование
5 мин	9 мин	14 мин

Примечание. Значения даны как среднее по 5 измерениям при коэффициенте вариации 0,27.  
 Note. Values are given as the average of five measurements with a coefficient of variation of 0.27.



**Рис. 3.** Результаты имитационного моделирования напряженного состояния режущего инструмента при точении стали марки 09Х17Н7Ю режущей керамикой марки ВОК-71 (а, б) и режущей керамикой ВОК-71 с покрытием Ti+TiN+(NbZrTiAl)N (с, д): а, б – максимальные основные напряжения (МПа); с, д – результирующие скорости деформации (мм/с).  
 Цветовая гамма демонстрирует диапазон иллюстрируемого параметра, слева внизу приведен график, отражающий динамику данного процесса

**Fig. 3.** Results of simulation modelling of the stress state of the cutting tool when turning 09H17N7Yu steel with VOK-71 cutting ceramics (a, b) and VOK-71 cutting ceramics with a Ti+TiN+(NbZrTiAl)N coating (c, d): a, b – maximum primary stresses (MPa); c, d – resulting strain rates (mm/s).

The colour scheme demonstrates the range of the illustrated parameter, a graph reflecting the dynamics of this process is shown at the bottom left

**Таблица 2.** Числовые значения величин, составляющих силы резания, при точении режущей керамикой ВОК-71 с покрытием Ti+TiN+(NbZrTiAl)N при скорости резания 120 м/мин с глубиной резания 0,1 мм  
**Table 2.** Numerical values of the quantities composing the cutting forces when turning with VOK-71 cutting ceramics with a Ti+TiN+(NbZrTiAl)N coating at a cutting speed of 120 m/min with a cutting depth of 0.1 mm

Составляющие результирующей силы резания	Марка стали		
	09X17H7Ю	12X18H10Т	13X15H AM-3
Продольная составляющая силы резания $F_x$ , Н	85,5/106	64,7/98	35,2/54
Радиальная составляющая силы резания $F_y$ , Н	305,2/382	308,0/396	310,1/404
Вертикальная составляющая силы резания $F_z$ , Н	362,5/465	284,6/320	191,4/241

Примечание. В знаменателе указаны значения для случая применения ВОК-71 без покрытия.  
 Note. The denominator shows the values for the case of using VOK-71 without coating.

**Таблица 3.** Результаты имитационного моделирования архитектуры покрытия  
**Table 3.** Results of simulation modelling of the coating architecture

Марка режущей керамики	Скорость резания	Покрытие		
		Ti+TiN+(NbZrTiAl)N	Ti+Zr+ZrN+(ZrAlNb)N	Ti+Zr+(TiCN)+(TiZrAl)CN
<b>Повышение периода стойкости, раз</b>				
ВОК-60	до 100 м/мин	3,2*		
ВОК-71		3**	3,8***	
ВОК-60	от 100 м/мин до 130 м/мин	3		3,5
ВОК-71		3,6		3,3

Примечание. \* при повышении скорости резания на 25 %;  
 \*\* при повышении скорости резания на 20 %;  
 \*\*\* при повышении скорости резания на 32 %.  
 Note. \* when increasing the cutting speed by 25 %;  
 \*\* when increasing the cutting speed by 20 %;  
 \*\*\* when increasing the cutting speed by 32 %.

**Таблица 4.** Значения прогнозируемых составляющих силы резания при точении стали 09X17H7Ю режущей керамикой, находящейся в разном состоянии  
**Table 4.** Values of predicted cutting force components when turning 09H17N7Yu steel with cutting ceramics in different states

Инструментальный материал	Продольная $F_x$ составляющая силы резания, Н	Радиальная $F_y$ составляющая силы резания, Н	Вертикальная $F_z$ составляющая силы резания, Н
ВОК-60	120	340	440
ВОК-60 с покрытием Ti+TiN+(NbZrTiAl)N	95	300	370
ВОК-71	96	310	370
ВОК-71 + термообработка + ионное азотирование	82	270	310
ВОК-71 с покрытием Ti+TiN+(NbZrTiAl)N	64	220	260

режущей керамики ВОК-71. Обоснована и экспериментально подтверждена возможность высокоскоростной обработки труднообрабатываемых вязких сталей указанной режущей керамикой. Это достигнуто в том числе за счет нанесения упрочняющих покрытий методом конденсации с ионной бомбардировкой, что обеспечило повышение скорости резания до 100 м/мин и более с повышением периода стойкости режущей керамики с 3 до 3,8 раза.

Это позволяет считать, что поставленная выше цель работы (исследовать возможность высокопроизводительной токарной обработки заготовок деталей, выполненных из труднообрабатываемой стали марки 09X17H7Ю со скоростью резания более 50 м/мин путем нанесения на режущую керамику ВОК-60 и ВОК-71 наноструктурированных покрытий и за счет предшествующей термообработки) достигнута. Химико-термическая обработка в виде ионного азотирования выполнена на установке типа «Булат» (Россия), которая работает по методу конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ). Это позволило легировать связку, что повысило прочность границ по зернам режущей керамики.

Сопоставление с имеющимися другими исследованиями [12; 13] показало высокий результат применения режущей керамики. Установлен факт роста периода стойкости режущей керамики в сравнении с твердым сплавом ВК8 в 7–10 раз в зависимости от применяемого технологического процесса упрочнения режущего инструмента. Выявлено, что в сравнении с режущей керамикой, находящейся в исходном состоянии, период стойкости для ВОК-71 вырос в 1,8 раза за счет применения термообработки и в 2,8 раза за счет применения термообработки с последующим ионным азотированием. Полученные результаты дополняют (изменяют) рекомендации ведущих в мире инструментальных фирм Walter (Германия), Sandvik Coromant (Швеция), Mitsubishi (Япония), ISCAR (Израиль). Результаты не противоречат существующим представлениям, сформулированным в работах [14–18]. Показано, что полученные результаты применимы для родственных труднообрабатываемых нержавеющей сталей 12X18H10T и 13X15H AM-3.

Дальнейшие исследования авторы планируют провести в направлении выявления вклада того или иного покрытия в повышение периода стойкости инструмента, выявления доли вклада термообработки и термообработки с последующим ионным азотированием.

Научная новизна работы, по мнению авторов, состоит в том, что обоснована возможность применения режущей керамики ВОК-60 и ВОК-71 для точения заготовок деталей, выполненных из труднообрабатываемой специализированной нержавеющей стали марки 09X17H7Ю за счет применения упрочняющих покрытий, а также за счет термообработки и термообработки с последующим ионным азотированием. По сути, применение программной среды deform как инструментария для проектирования покрытий также является научной новизной работы. Практическая значимость такого применения программной среды deform позволила еще на стадии проектирования покрытий выбрать наиболее рациональные покрытия из всех возможных вариантов. Это значимая экономия средств и времени исследований.

В качестве итога выполненных исследований можно заключить следующее: разработан арсенал технологи-

ческих процессов изготовления инструмента, выполненного из режущей керамики. Для конкретных условий эксплуатации инструмента необходимо лишь выбрать из этого арсенала наиболее рациональный технологический процесс по показателю работоспособности инструмента с учетом производительности и стоимости.

Практическая значимость работы состоит в том, что установлены параметры режима резания, при которых в наиболее полной мере реализуются эффекты повышения производительности и периода стойкости инструмента.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе имитационного моделирования напряженного состояния режущего инструмента, а также исследования процесса точения труднообрабатываемой коррозионностойкой нержавеющей стали марки 09X17H7Ю доказана возможность применения режущей керамики марок ВОК-60 и ВОК-71.

Применение покрытий в сравнении с режущей керамикой без покрытия позволило повысить период стойкости режущей керамики с 25 до 32 % с повышением скорости резания до 100 м/мин.

Производительность обработки в сравнении с твердым сплавом ВК8 возросла в 1,4–2,6 раза.

Прирост периода стойкости в сравнении с ВК8 составил 7–10 раз.

В сравнении с режущей керамикой, находящейся в исходном состоянии, период стойкости увеличился в 1,8 раза за счет применения термообработки и в 2,8 раза за счет применения термообработки с последующим ионным азотированием.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мокрицкий Б.Я., Мокрицкая Е.Б. Лезвийная обработка упрочненных материалов. Часть 3. Обработка заготовок деталей, упрочненных наплавками высокой твердости // Упрочняющие технологии и покрытия. 2021. Т. 17. № 11. С. 495–497. DOI: [10.36652/1813-1336-2021-17-11-495-497](https://doi.org/10.36652/1813-1336-2021-17-11-495-497).
2. Мокрицкий Б.Я., Шелковников В.Ю., Ситамов Э.С., Морозова А.В., Мокрицкая Е.Б. Твёрдосплавные пластины и покрытия к ним для точения труднообрабатываемых нержавеющей сталей // Транспортное машиностроение. 2022. № 1-2. С. 60–68. DOI: [10.30987/2782-5957-2022-01-02-60-68](https://doi.org/10.30987/2782-5957-2022-01-02-60-68).
3. Özel T., Altan N. Determination of workpiece flow stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2000. Vol. 40. № 1. P. 133–152. DOI: [10.1016/S0890-6955\(99\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00051-6).
4. Deederich N. Metallischer Zwischeuschichten im Bereich der Aufbanschneidesbildung // Ind.-Anz. 1968. Vol. 90. № 24. P. 457–460.
5. Fuch M., Scheffer M. Ab initio pseudopotentials for electronic structure calculations of poly-atomic systems using density-functional theory // Computer Physics Communications. 1999. Vol. 119. № 1. P. 67–98. DOI: [10.1016/S0010-4655\(98\)00201-X](https://doi.org/10.1016/S0010-4655(98)00201-X).
6. Петрушин С.И., Проскоков А.В. Стружкообразование с развитой зоной пластических деформации при резании металлов // Известия Томского политехни-



- ческого университета. 2009. Т. 314. № 2. С. 57–62. EDN: [KWMASR](#).
7. Петрушин С.И. Основы формообразования резанием лезвийными инструментами. Томск: ТПУ, 2004. 204 с.
  8. Music D., Schneider J.M. Effect of transition metal additives on electronic structure and elastic properties of TiAl and Ti<sub>3</sub>Al. *Physical Review B*, 2006, vol. 74, no. 17, article number 174110. DOI: [10.1103/PhysRevB.74.174110](#).
  9. Криворучко Д.В., Залого В.А. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы. Сумы: Университетская книга, 2012. 496 с.
  10. Metel A.S., Volosova M.A., Mustafaev E.S., Melnik Y.A., Okunkova A.A., Grigoriev S.N. Improving the Quality of Ceramic Products by Removing the Defective Surface Layer // *Ceramics*. 2024. Vol. 7. № 1. P. 55–67. DOI: [10.3390/ceramics7010005](#).
  11. Grigoriev S.N., Vereschaka A.A., Fyodorov S.V., Sitnikov N.N., Batako A.D. Comparative analysis of cutting properties and nature of wear of carbide cutting tools with multi-layered nano-structured and gradient coatings produced by using of various deposition methods // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 90. P. 3421–3435. DOI: [10.1007/s00170-016-9676-z](#).
  12. Vereschaka A.A., Mokritskii B.Ya., Sitnikov N.N., Oganyan G.V., Aksenenko A.Y. Study of mechanism of failure and wear of multi-layered composite nano-structured coating based on system Ti-TiN-(ZrNbTi)N deposited on carbide substrates // *Journal of Nano Research*. 2017. Vol. 45. P. 110–123. DOI: [10.4028/www.scientific.net/JNanoR.45.110](#).
  13. Lin Zhijun, Wang Lin, Zhan Jianzhong, Mao Hokuang, Zhao Yusheng. Nanocrystalline tungsten carbide: As incompressible as diamond // *Applied Physics Letters*. 2009. Vol. 95. № 21. Article number 211906. DOI: [10.1063/1.3268457](#).
  14. Pyatykh A.S., Savilov A.V., Timofeev S.A., Svinin V.M., Maizel I.G. Influence of Protective Coatings of Inserts on Cutting Forces during Milling of Hadfield Steel // *Journal of Friction and Wear*. 2023. Vol. 44. № 3. P. 156–163. DOI: [10.3103/s1068366623030078](#).
  15. Horlin N. TiC coated cemented carbides – their introduction and impact on metal cutting // *Product Engineering*. 1971. Vol. 50. № 4. P. 153–159.
  16. Yadollahi A., Shamsaei N., Thompson S.M., Elwany A., Bian L. Effects of building orientation and heat treatment on fatigue behavior of selective laser melted 17-4 PH stainless steel // *International Journal of Fatigue*. 2017. Vol. 94. Part 2. P. 218–235. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2016.03.014](#).
  17. Ahmadkhaniha D., Möller H., Zanella C. Studying the Microstructural Effect of Selective Laser Melting and Electropolishing on the Performance of Maraging Steel // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021. Vol. 30. P. 6588–6605. DOI: [10.1007/s11665-021-05927-6](#).
  18. Jovičević-Klug P., Lipovšek N., Jovičević-Klug M., Podgornik B. Optimized Preparation of Deep Cryogenic Treated Steel and Al-alloy Samples for Optimal Microstructure Imaging Results // *Materials Today Communications*. 2021. Vol. 27. Article number 102211. DOI: [10.1016/j.mtcomm.2021.102211](#).
- ## REFERENCES
1. Mokritskiy B.Ya., Mokritskaya E.B. Blade processing of hardened materials (in parts). Part 3. Processing of workpieces of parts hardened by high-hardness surfacing. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2021, vol. 17, no. 11, pp. 495–497. DOI: [10.36652/1813-1336-2021-17-11-495-497](#).
  2. Mokritskiy B.Ya., Shelkovnikov V.Yu., Sitamov E.S., Morozova A.V., Mokritskaya E.B. Carbide inserts and coatings to them for turning hard-to-machine stainless steels. *Transportnoe mashinostroenie*, 2022, no. 1-2, pp. 60–68. DOI: [10.30987/2782-5957-2022-01-02-60-68](#).
  3. Özel T., Altan N. Determination of workpiece flow stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, vol. 40, no. 1, pp. 133–152. DOI: [10.1016/S0890-6955\(99\)00051-6](#).
  4. Deederich N. Metallischer Zwischeuschichten im Bereich der Aufbanschneidesbildung. *Ind.-Anz.*, 1968, vol. 90, no. 24, pp. 457–460.
  5. Fuch M., Scheffer M. Ab initio pseudopotentials for electronic structure calculations of poly-atomic systems using density-functional theory. *Computer Physics Communications*, 1999, vol. 119, no. 1, pp. 67–98. DOI: [10.1016/S0010-4655\(98\)00201-X](#).
  6. Petrushin S.I., Proskokov A.V. Chip formation with the developed area of plastic deformations at material cutting. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2009, vol. 314, no. 2, pp. 57–62. EDN: [KWMASR](#).
  7. Petrushin S.I. *Osnovy formoobrazovaniya rezaniem lezviyными инструментами* [Basics of shaping by cutting with blade tools]. Tomsk, TPU Publ., 2004. 204 p.
  8. Music D., Schneider J.M. Effect of transition metal additives on electronic structure and elastic properties of TiAl and Ti<sub>3</sub>Al. *Physical Review B*, 2006, vol. 74, no. 17, article number 174110. DOI: [10.1103/PhysRevB.74.174110](#).
  9. Krivoruchko D.V., Zaloga V.A. *Modelirovanie protsessov rezaniya metodom konechnykh elementov: metodologicheskie osnovy* [Modeling of cutting processes by the finite element method: methodological foundations]. Sumy, Universitetskaya kniga Publ., 2012. 496 p.
  10. Metel A.S., Volosova M.A., Mustafaev E.S., Melnik Y.A., Okunkova A.A., Grigoriev S.N. Improving the Quality of Ceramic Products by Removing the Defective Surface Layer. *Ceramics*, 2024, vol. 7, no. 1, pp. 55–67. DOI: [10.3390/ceramics7010005](#).
  11. Grigoriev S.N., Vereschaka A.A., Fyodorov S.V., Sitnikov N.N., Batako A.D. Comparative analysis of cutting properties and nature of wear of carbide cutting tools with multi-layered nano-structured and gradient coatings produced by using of various deposition methods. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 90, pp. 3421–3435. DOI: [10.1007/s00170-016-9676-z](#).
  12. Vereschaka A.A., Mokritskii B.Ya., Sitnikov N.N., Oganyan G.V., Aksenenko A.Y. Study of mechanism of failure and wear of multi-layered composite nano-structured coating based on system Ti-TiN-(ZrNbTi)N deposited on carbide substrates. *Journal of Nano Research*, 2017, vol. 45, pp. 110–123. DOI: [10.4028/www.scientific.net/JNanoR.45.110](#).
  13. Lin Zhijun, Wang Lin, Zhan Jianzhong, Mao Hokuang, Zhao Yusheng. Nanocrystalline tungsten

- carbide: As incompressible as diamond. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 95, no. 21, article number 211906. DOI: [10.1063/1.3268457](https://doi.org/10.1063/1.3268457).
14. Pyatykh A.S., Savirov A.V., Timofeev S.A., Svinin V.M., Maizel I.G. Influence of Protective Coatings of Inserts on Cutting Forces during Milling of Hadfield Steel. *Journal of Friction and Wear*, 2023, vol. 44, no. 3, pp. 156–163. DOI: [10.3103/s1068366623030078](https://doi.org/10.3103/s1068366623030078).
  15. Horlin N. TiC coated cemented carbides – their introduction and impact on metal cutting. *Product Engineering*, 1971, vol. 50, no. 4, pp. 153–159.
  16. Yadollahi A., Shamsaei N., Thompson S.M., Elwany A., Bian L. Effects of building orientation and heat treatment on fatigue behavior of selective laser melted 17-4 PH stainless steel. *International Journal of Fatigue*, 2017, vol. 94, part 2, pp. 218–235. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2016.03.014](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.03.014).
  17. Ahmadkhaniha D., Möller H., Zanella C. Studying the Microstructural Effect of Selective Laser Melting and Electropolishing on the Performance of Maraging Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, vol. 30, pp. 6588–6605. DOI: [10.1007/s11665-021-05927-6](https://doi.org/10.1007/s11665-021-05927-6).
  18. Jovičević-Klug P., Lipovšek N., Jovičević-Klug M., Podgornik B. Optimized Preparation of Deep Cryogenic Treated Steel and Al-alloy Samples for Optimal Microstructure Imaging Results. *Materials Today Communications*, 2021, vol. 27, article number 102211. DOI: [10.1016/j.mtcomm.2021.102211](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102211).

## Cutting ceramics for turning of specialised stainless hard-to-machine steel

**Boris Ya. Mokritskiy**<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, professor of Chair “Machine Engineering”

**Pavel A. Sablin**\*<sup>2</sup>, PhD (Engineering), Associate Professor, assistant professor of Chair “Machine Engineering”

**Aleksandr V. Kosmyinin**<sup>3</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, professor of Chair “Shipbuilding and Computing Engineering”

*Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur (Russia)*

\*E-mail: [ikpmto@knastu.ru](mailto:ikpmto@knastu.ru)

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4727-9873>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5950-9010>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3200-0190>

Received 08.09.2023

Revised 23.01.2024

Accepted 20.02.2025

**Abstract:** This study shows the possibility of using cutting ceramics as a turning tool. Replaceable standard cutting plates made of VOK-60 and VOK-71 cutting ceramics are used. In the work, based on simulation modelling in the DEFORM software environment, the possibility of high-speed processing with the specified cutting ceramics is substantiated and then experimentally confirmed. Additionally, the authors propose to apply hardening coatings by condensation with ion bombardment, which ensures an increase in the cutting speed to 100 m/min and more with an increase in the service life of the cutting ceramics from 3 to 3.8 times. The maximum stresses in the tool material and the deformation rate of the process material are studied. To select rational solutions in simulation modelling, the authors used the “temperature in the cutting zone”, “stresses in the tool material”, and “tool wear” parameters, which characterise the combined tension of the tool material. The transition from these parameters to the predictive design of cutting ceramics was performed by measuring the cutting force during natural cutting. The measured values of the cutting force components were used to calculate the stresses in the tool material. The study confirmed the hypothesis that the cutting ceramics is capable of operating under the conditions of processing viscous hard-to-machine corrosion-resistant specialised stainless steels such as 09H17N7Yu (C-0.09; Cr-17; Ni-7; Al-1) grade (EU 1.4568, X7CrNiAl17-7), which have a high content of chromium (16–17.5 %) and nickel (7–8 %). The authors propose original technological methods to improve the performance of the cutting ceramics through special heat treatment and coating deposition. In particular, heat treatment in a vacuum at a temperature of 1100–1400 °C for 20–40 min increased the bulk strength of the ceramics, and additional thermochemical treatment by ion nitriding performed at the final stage of heat treatment made it possible to alloy the bond.

**Keywords:** cutting ceramics; turning of stainless steel; turning process modelling; cutting speed.

**Acknowledgments:** The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 23-29-00393, <https://rscf.ru/project/23-29-00393/>.

**For citation:** Mokritskiy B.Ya., Sablin P.A., Kosmyinin A.V. Cutting ceramics for turning of specialised stainless hard-to-machine steel. *Frontier Materials & Technologies*, 2025, no. 1, pp. 35–45. DOI: 10.18323/2782-4039-2025-1-71-3.